速度センサ併用高温超電導ハイブリッド磁気浮上系の
 H_∞ 制御*金澤 顕 禎^{*1}, 松田 健 一^{*2}
岡田 養 二^{*2}, 谷 順 二^{*3}Hybrid Vibration Control Using Superconductor as Levitation and
Velocity Sensor and Application of H_∞ Control TheoryTakayoshi KANAZAWA, Ken-ichi MATSUDA,
Yohji OKADA and Junji TANI

A new method of using a high T_c superconductor as two functions of levitation device and velocity sensor is introduced. The levitated object is controlled with an electromagnet using the measured velocity signal, that is, the system involves a hybrid magnetic levitation of superconductor pinning effect and active magnetic bearing. The experimental setup of a single degree of freedom system is made using a cantilever beam. A coil is wound around a permanent magnet which is used as a velocity sensor. This coil produces electromotive voltage in proportion to relative velocity. In order to insulate against vibration from the base and to reduce vibration from external force an H_∞ optimum controller is designed. A simple experimental setup is made and the results obtained are discussed in detail.

Key Words: Vibration Isolation, High T_c Superconductor, Magnetic Levitation, Sensor, Vibration Control, Robust Control

1 はじめに

MPMG(Melt-Powder-Melt-Growth) 法等の開発により、高臨界電流密度を持つ YBaCuO 高温超電導体の製造が可能となっている。このイットリウム系高温超電導体は、大きなピン止め効果を持ち、強力な浮上力を発生させるため、磁気浮上の分野での応用が期待されている。しかし、ピン止め効果の状態の動力学特性は大変複雑であり、磁束フロー、磁束クリープといった現象に起因する電磁力の変化や振動特性の研究[1]が行われ、種々の応用が試みられている。

磁気浮上による能動型防振は、絶縁対象を空間に浮上させて運動を制御するため、物体を非接触で支持することになる。これは外部との接触がないので、弾性支持による防振装置より数段良い振動絶縁性が得られ、また防振材を使用しないため防塵性にも優れていると考えられる。このためクリーンルームや精密測定器への利用に適している[2][3]。

本研究では超電導磁気浮上を利用した除振床に関する基礎

研究として、一自由度の梁を実験装置とし、超電導浮上と電磁石によるアクティブ制振のハイブリッド制御を試みる。

ピン止め効果による超電導磁気浮上系は元来安定な系であるが、そのまま磁気浮上防振系として使用するには、減衰が小さく、台座から浮上体への振動伝達率に共振周波数を持つため十分な性能とはいえない。そこで本研究では、基本的浮上力はピン止め効果の拘束力を使用し、その振動制御に常電導電磁石による吸引力を利用する。この超電導磁気浮上と、常電導電磁石によるアクチュエータを組み合わせ、ハイブリッド超電導磁気浮上系を構成し、その振動制御を目的とする。

超電導を単純な磁気浮上として利用するだけでなく、永久磁石の回りにコイルを巻き、超電導体と浮上している永久磁石との相対速度を検出する速度センサとして使用することを提案する。これは永久磁石の回りにコイルを巻くという単純な手法で、相対速度を正確に測定できる巧妙な手法である。この信号を電磁石の制振に使い、振動特性の改善に有効なことを確認した。

しかし相対速度フィードバックは、振動遮断特性を悪化させる。そこで本研究では制御系設計の仕様として、浮上体へ直接加わる外乱入力と、台座からの速度の入力に対して、浮

* 原稿受付 1995年3月20日。

*¹ 学生員、茨城大学大学院 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。*² 正員、茨城大学工学部。*³ 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

上体の絶対速度を押さえる制御を考える。浮上系の観測出力には、提案した検出方法により、浮上体と台座との相対速度を用いる。更に、浮上体に加速度センサーを取り付け、浮上体の絶対加速度を検出する。この浮上体の相対速度と絶対加速度を入力とする補償器を、 H_c 制御理論に基づく手法を用いて設計し、シミュレーションを行った。更に、その補償器によって実験を行い、多入力系で振動減衰特性、遮断特性が良好で、ロバスト安定性を向上させる系が作れることを確認したので報告する。

2 超電導ハイブリッド磁気浮上除振系

2.1 実験装置 磁気浮上除振系の基本特性を確認するため、一自由度の梁を制御対象とし実験を行う。図1に実験装置の概略図を示す。梁の一端はボールベアリングにより支持し、自由端には浮上力を得るための永久磁石を取り付ける。梁の長さは600[mm]であり、浮上位置での質量は2.02[kg]である。

永久磁石は(株)住友特殊金属NEOMAX-32H 大きさ $70 \times 50 \times 16$ [mm]、磁場の強さは開放で1.168[T]である。

使用する超電導体は、第二種超電導体であるMPMG法によって作られたYBaCuO 高温超電導体(臨界温度約100[K])を使用した。外形寸法は $40 \times 40 \times 15$ [mm]である。この超電導体を発砲スチロール製の容器内に平面状に四個並べ、上面は雲母板により支持する。超電導体の冷却には液体窒素(77[K])を使用する。

速度検出コイルは直径0.3[mm]の銅線を、永久磁石の最下位置より2[mm]下から、幅6[mm]に85回巻く。制御コイルは、断面積 15.0×10^{-4} [m²]の鉄心に、直径1[mm]の銅線を840回巻いたものを使う。この鉄心の磁路長は240[mm]である。

Figure 1: Scheme of Experimental Setup

2.2 速度検出実験 振動の制御に、台座と浮上体の相対速度を補償器への入力として使用するために、浮上体と台座の相対速度の検出を考える。

ピン止め効果による浮上状態は、超電導体の反磁性による磁束拘束なので、浮上している永久磁石が振動すると、超電

導体と永久磁石の付近の磁束が変化すると考えられる。この磁束の変化は、超電導体と永久磁石との相対速度に比例する。そこで、浮上力を得るために使用する永久磁石の回りにコイルを巻くと、浮上している永久磁石の振動による磁束密度の変化で、このコイルに起電力が発生し相対速度を検出することができる。

実験は梁を持ち上げた状態で、超電導体を液体窒素により冷却し、十分に冷えて超電導状態になった後梁を下げピン止め浮上を行う。電磁石と吸引体のギャップは1.4[mm]、永久磁石と超電導体のギャップは7.1[mm]とした。ピン止め状態にある浮上体にハンマでインパルス入力を与え、浮上体上部にギャップセンサを取り付け、振動の変位を計測する。同時にこのときの永久磁石の回りに巻いたコイルの起電力を測定した。ギャップセンサで検出した変位波形と、提案した相対速度センサの信号を図2に示す。

これより、浮上用永久磁石の回りに巻いた速度検出用コイルは、浮上体と台座との相対速度を精度よく検出していることが解る。この実験では、速度の符号は反転しており、速度1[m/sec]は10[mV]の検出力となっている。

Figure 2: Comparison of Velocity Sensing Signal and Measured Displacement Signal

2.3 直接フィードバック制御 実験装置に取り付けた速度検出用コイルから浮上体と台座の相対速度が検出できるので、この速度信号に比例した制御入力を与えれば、浮上系に加わる外乱からの制振効果が期待できる。そこで、浮上体と台座との相対速度信号をパワーアンプにそのまま入力し、振動制御用の電磁石のコイルに速度信号に比例した電流を流すことにより振動の制御を試みる。

実験は浮上体にハンマによるインパルスを与え、応答を測

定した。実験結果を図3に示す。図より良い制振効果が確認できる。

実験では超電導体である基礎を加振するのは困難なので、シミュレーションにより浮上体の振動遮断特性を求める。図4に振動伝達特性を示す。相対速度フィードバックは減衰特性は改善するが、当然ながら高周波の遮断特性を悪化させる。なお図4のシミュレーションは、図3の実験でのゲイン ($K=0.8$) より大きい値 ($K=14$) を使い、高周波の特性を強調している。

(a) Displacement

(b) Control Input

Figure 3: Impulse Response of Displacement and Control Input

Figure 4: The Simulated Transmissibility from Base to Levitated Object

3 磁気浮上系のロバスト制御について

前節の速度フィードバックは、超電導磁気浮上系に減衰を与え、動特性上は良好な結果のように見える。しかし除振台としては、相対速度フィードバックにより高周波での振動遮断特性が悪化する。そこで制御信号として浮上台の加速度信号も検出し、台に加わる外力及び基礎からの入力に対して浮上台の速度を小さくする制御系を設計する。また制御対象の乗法的摂動を考慮して、ロバストコントローラを設計する。

3.1 モデリング 本研究に使用するハイブリッド超電導磁気浮上系を、図5のような1自由度の浮上系と考える。超電導のピン止め効果による拘束は、微小変位の振動であれば、バネと粘性減衰によるものと近似できる[1][4]。ここで、超電導浮上系の等価バネ定数を K 、等価減衰定数を C とする。ここで使う変数を Table 1 に示す。

Figure 5: Single Degree-of-Freedom Model

Table 1: Parameters and Variables

浮上体の質量 : M	制御電流 : i
浮上体の変位 : x_1	台座の変位 : x_0
電磁石の吸引力 : f_m	浮上体への外力 : f_d
電磁石のバネ定数 : Φ	電磁石の力定数 : Ψ

観測出力には浮上体と台座との相対速度と、浮上体の絶対加速度を検出する。また制御量は浮上体の絶対速度とすると、状態方程式、出力方程式、制御則は次式となる。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_p \mathbf{x} + \mathbf{B}_{p1} \mathbf{w} - \mathbf{B}_{p2} u \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_{p1} \mathbf{x} + \mathbf{D}_{p11} \mathbf{w} - \mathbf{D}_{p12} u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_{p2} \mathbf{x} + \mathbf{D}_{p21} \mathbf{w} - \mathbf{D}_{p22} u \\ u = \mathbf{K}(s) \mathbf{y} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{z}$ は制御量、 $\mathbf{y}$ は観測出力、 u は制御入力であり、各要素は次式で与えられる。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = [\dot{x}_1]$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 - \dot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ f_d \end{bmatrix}, \quad u = [i]$$

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K+\Phi}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{p1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{C}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{p2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Psi}{M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{p1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{p11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{p12} = [0]$$

$$C_{p2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K+\Phi}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix}, \quad D_{p21} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{C}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix}$$

$$D_{p22} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Psi}{M} \end{bmatrix}$$

実験装置より質量(M)は2.02[kg]である。定常状態での電磁石と吸引体とのギャップを1.9[mm]、超電導体と永久磁石とのギャップを6.6[mm]とする。バイアス電流(i_0)は0.2[A]を流す。このとき電磁石の定数は、それぞれ $\Phi = -5.23 \times 10^3$, $\Psi = 4.95$ である。

ピン止め効果をバネと粘性減衰に近似したときの定数 K 、 C はピン止め状態の自由振動波形 図 2(a) より求める。ピン止め効果の等価定数を Table 2 に示す。

Table 2: Equivalent Constants of Levitated Dynamics

固有振動数	: ω_n	11.2	[Hz]
近似バネ定数	: K	9.96×10^3	[N/m]
近似粘性減衰定数	: C	14.8	[N·sec/m]

3.2 制御性能に対する仕様 制御量には浮上体の絶対速度を考える。制御仕様としては外乱から浮上体の絶対速度への閉ループ伝達関数のシステムゲインを出来るだけ小さくする。

前節で求めたように、この浮上系の無制御状態の固有振動数は11.2[Hz]である。また、想定される外乱入力のなかで台座への入力基礎の振動の影響であり、基礎の振動の主要成分は10[Hz]以下と考え、浮上体への外乱入力も低周波数が主であると考ええる。

従って低周波数帯においての制振を主とし、制御量に対して周波数重みを次式とする。

$$W_P(s) = \frac{10}{\frac{s}{40\pi} + 1} \quad (2)$$

ピン止め効果による磁気浮上は、磁束クリープなどの影響により、モデル化された公称プラントに対して、不確かさが加わった摂動プラントと考えられる。この不確かさを考慮し、周波数重み $W_T(s)$ を考える。

$$W_T(s) = \frac{\frac{s}{2 \times 10^4 \pi} + 1}{\frac{s}{10\pi} + 1} \begin{bmatrix} 1.7 \times 10^{-2} & 0 \\ 0 & 1.7 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

プラントへの制御入力は電流であるが、これはパワーアンプの限界を超える電流を与えることは出来ない。また、制御

用電磁石のバイアス電流を越える負の電流を流しても制御にはならない。従って、ここで制御入力に関する重み W_u を考える。この重み W_u の値を大きくとれば制御入力は小さくなり、逆に小さくとれば制御入力は大きくなるので、シミュレーションを行い W_u の値を次のように決定した。

$$W_u = 8.5 \times 10^{-2} \quad (4)$$

3.3 拡大プラント 式 (1) で表現されるプラントを制御性能、相補感度、制御入力に対する重みにより拡大する。この一般化プラントのブロック線図を 図 6 に示す。この一般化プラント G は、各重み関数を

$$W_P(s) = \begin{bmatrix} A_{wp} & B_{wp} \\ C_{wp} & D_{wp} \end{bmatrix}$$

$$W_T(s) = \begin{bmatrix} A_{wt} & B_{wt} \\ C_{wt} & D_{wt} \end{bmatrix}$$

と置けば

$$G = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 & B_{p1} & 0 & -B_{p2} \\ B_{wp}C_{p1} & A_{wp} & 0 & B_{wp}D_{p11} & 0 & -B_{wp}D_{p12} \\ B_{wt}C_{p2} & 0 & A_{wt} & 0 & 0 & -B_{wt}D_{p22} \\ D_{wp}C_{p1} & C_{wp} & 0 & D_{wp}D_{p11} & 0 & -B_{wp}D_{p12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_u \\ D_{wt}C_{p2} & 0 & C_{wt} & 0 & 0 & D_{wt}D_{p22} \\ C_{p2} & 0 & 0 & D_{p21} & I_2 & -D_{p22} \end{bmatrix}$$

となる。

Figure 6: Block Diagram of Closed Loop System with H_∞ Controller

4 H_∞ 補償器設計と制振実験

4.1 補償器設計 補償器設計にはMATLABのロバストコントロールツールボックスを使用して求めた。 $W_T(s)$ 、 W_u を固定し、 $W_P(s)$ のみ $1/\gamma$ 倍してイタレーションを行った。このとき $\gamma = 176$ で解くことができた。

補償器は

$$K_1(s) = \frac{3.6204 \times 10^{-11}s^4 - 7.6618s^3 - 2.2684 \times 10^4s^2}{s^4 + 5.8916 \times 10^3s^3 + 2.6504 \times 10^6s^2 - 2.7542 \times 10^6s - 3.0934 \times 10^6 + 2.4385 \times 10^8s + 2.3194 \times 10^8}$$

$$K_2(s) = \frac{-3.3357 \times 10^{-10}s^4 + 4.7470 \times 10s^3}{s^4 + 5.8916 \times 10^3s^3 + 2.2318 \times 10^5s^2 + 4.9011 \times 10^7s + 2.7287 \times 10^9 + 2.6504 \times 10^6s^2 + 2.4385 \times 10^8s + 2.3194 \times 10^8}$$

と求められた。この補償器のゲイン特性を図7に示す。

Figure 7: Gain Plot of H_∞ Controller

4.2 シミュレーション この補償器を用いてシミュレーションを行った。図8に浮上体へのインパルス入力に対する、制御時の浮上体の絶対速度、無制御時の絶対速度の時間応答を示す。

Figure 8: Impulse Response from the External Force

また図9に台座からのインパルス入力に対する、浮上体の絶対速度、無制御時の浮上体の絶対速度の時間応答を示す。どちらの外乱入力に対しても、無制御時にはきわめて振動的であるが、本手法の制御により振動を抑えることができる。

Figure 9: Impulse Response from the Base Vibration

次に、浮上体に加わる外乱入力から浮上体への速度応答を図10に、台座の速度入力から浮上体の速度応答を図11に示す。図11は、速度入力に対する速度応答の振動伝達特性であり、図4に対応する。どちらの応答も共振を抑えるのみならず、振動の伝達特性も抑え、良好な結果となっている。

Figure 10: Frequency Response from the External Force

Figure 11: Frequency Response from the Base Vibration

これは単に相対速度フィードバックを用いるのではなく、相対速度と絶対加速度の2つの入力を使った効果であり、このような多入力系の設計に H_∞ 理論は有効である。

4.3 制振実験 前節において求めた補償器をサンプリング周期 0.5[msec] で、双一次変換により離散化しデジタル制御を行う。実験には、制御用コントローラに EPSON PC-486GR を使用した。また、プログラム言語には Borland C を使用した。

まず、超電導体と永久磁石が十分離れた状態で、超電導を冷却し、充分冷えてから定常状態のギャップとした。そして、ハンマにより浮上体にインパルス入力を与え、速度応答を測定した。この時の浮上体と台座の相対速度の応答と、制御電流を図12に示す。本実験では台座を固定しており、この場合浮上体と台座の相対速度と、浮上体の絶対速度は等価である。

Figure 12: Control Input and Response

図8のシミュレーションと比較して、オーバーシュートは多少大きいですが、主要な振動はよく抑えており良好な制振結果が得られている。しかし補償器の低周波ゲインが大きいため、制御用増幅器の低周波での安定性の悪さがでてしまい、低い周波数の振動が残ってしまった。このような実験では、定電圧電源を使った良好なパワーアンプを使用する必要がある。また周波数重み W_p のより良い選定によっては、応答特性を改善できる可能性がある。しかしながら H_∞ 制御理論によって、振動減衰特性を改善し、振動遮断特性の良いロバスト安定な磁気浮上除振系が設計できることが解った。

5 おわりに

本論文では、第二種超電導体のピン止め効果に注目し、ピン止め力を利用した磁気浮上と、電磁石を使った制振によるハ

イブリッド除振台を提案した。

ピン止め効果による超電導磁気浮上は、超電導体の反磁性と内部の常電導点のピン止めの性質によるものなので、永久磁石の下部側面にコイルを巻き、コイルの起電力を速度信号として検出する方法を提案した。これを使った速度フィードバックにより、共振がよく抑えられる。しかし相対速度フィードバックだけでは振動絶縁特性が悪化するので、この相対速度と、浮上体の絶対加速度を観測出力とし、浮上体の絶対速度を抑えることを設計仕様とするロバスト補償器を設計し、浮上体への外力、台座からの外乱入力に対して共に良い応答が確認できた。この補償器の有効性は、実験でもある程度確認できた。

H_∞ 制御理論は、多入力系の磁気浮上除振系に対し、振動の共振を抑え、基礎からの遮断特性を改善し、かつ、ロバスト安定な系を設計するのに有効であることが解った。

参考文献

- [1] Uesaka, M. et. al., Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference 93, Vol.3, p.1010
- [2] 岩田, 他3名, 機講論, No.930-63, p.641
- [3] 菊島, 他2名, 機講論, No.930-63, p.502
- [4] 谷, 他2名, The Third MAGDA Conference in Osaka, (1994), B12-1
- [5] 金澤, 他2名, 茨城地方講演論文集, (1994), p.120